

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



مقایسه عملکرد سیمان، سرباره کوره ذوب‌آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی یک خاک رسی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.74908.1115

امیر جهانی[۱]   علی رییسی استبرق[۲]   حسین خواجه‌پور[۳]   محدثه امینی[٤]

چکیده در این کار پژوهشی، اثر سیمان، سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن (GGBS) و سرباره فعال‌شده با اکسیدمنیزیم (MgO) به‌عنوان مواد افزودنی در بهسازی یک خاک رسی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفتند. برای فعال‌سازی GGBS از اکسیدمنیزیم با نسبت اختلاط ۳ (سرباره) به ۱ (اکسیدمنیزیم) استفاده گردید. بهسازی خاک در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ از مواد افزودنی مذکور انجام شد. آزمایش‌های حدود اتربرگ و تراکم استاندارد روی خاک‌های اختلاط‌یافته با مواد افزودنی مذکور انجام شد. هم‌چنین نمونه‌های لازم از این مواد اختلاط‌یافته برای تعیین مقاومت تک‌محوری و بررسی ریزساختار خاک با انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه گردید. مقاومت نمونه‌های تهیه‌شده در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱٤ و ۲۸ روز تعیین گردیدند. نتایج نشان داد که مقاومت نمونه‌ها تابعی از درصد مواد افزودنی مورد استفاده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. علاوه‌بر این مقایسه نتایج نشان داد که در درصد مشخص و زمان عمل‌آوری معین، مقاومت نمونه‌های بهسازی شده با سرباره از نمونه‌های حاوی سرباره فعال شده کمتر می‌باشد. هم‌چنین با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش SEM مشخص شد که با افزودن مواد افزودنی مذکور به خاک رسی، مواد سیمانته‌کننده‌ای در اثر عمل متقابل آنها با خاک طی فرایند شیمیایی تشکیل می‌شود که منجر به اتصال ذرات خاک و مواد افزودنی به یکدیگر و در نتیجه تشکیل جسمی با مقاومت بالا می‌گردد. هم‌چنین در این پژوهش ارزیابی اقتصادی برای بهسازی خاک با مواد افزودنی مذکور انجام شد و مناسب‌ترین ماده افزودنی برای این امر پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی بهسازی خاک رسی، سیمان، سرباره کوره ذوب‌آهن، اکسیدمنیزیم، سرباره فعال شده.

Comparison of the Effect of Cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and Activated GGBS on the Improvement of the Behaviors of a Clay Soil

Amir Jahani   Ali Raeesi Estabragh   Hossin Khajepour   Mohadeseh Amini

Abstract In this research work, the effect of cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and activated GGBS with MgO on the treatment of a clay soil was studied through conducting the experimental tests. The ratios of 1:3 was considered for making the mixtures GGBS: MgO. The used percentages of additives were 5, 10, and 15%. Various experimental tests such as Atterberg limits, standard compaction, compressive strength (UCS), and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests were performed on the samples with different percentages of additives. Also, UCS tests were conducted on the compacted samples at curing times of 7, 14, and 28 days. The results of UCS indicated that all used additives are effective in improving the behaviors of soil, and their amount is dependent on the percentage of used additives and curing time. In addition, a comparison of the results showed that in a given percentage of additives and curing time, activated GGBS is more effective than GGBS alone in improving soil samples. Based on the SEM results, it was found that the increasing strength of stabilized soil is resulted from the interaction between soil particles and additives materials. An economical evaluation of soil improvement with used additives was also carried out and the best one was proposed for conducting in the field.

Keywords Clay soil improvement, Cement, GGBS, MgO, activated GGBS.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۱/۵/۲٤ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۱/۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(۲) استاد، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(۳) کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.
(٤) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه تهران.

Email: amir.jahani73@ut.ac.ir

مقدمه

خاک‌های رسی دارای مقاومت و نفوذپذیری کم، تراکم‌پذیری و قدرت تورمی زیاد می‌باشند. بنابراین خواص فیزیکی و مکانیکی آنها قبل از کاربرد آنها در پروژه‌های عمرانی می‌بایست اصلاح گردد. روش‌های گوناگون فیزیکی، فیزیکوشیمیایی و شیمیایی برای بهسازی این خاک‌ها وجود دارد. در بهسازی آنها، استفاده از روش شیمیایی بیشتر مورد توجه پژوهشگران می‌باشد[1]. در این روش با افزودن درصد مشخصی از مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و... به خاک، عمل بهسازی صورت می‌گیرد. این مواد با انجام یک سری واکنش‌های شیمیایی در مخلوط خاک و ماده افزودنی، سبب تثبیت و بهسازی آنها می-گردند[2].

امروزه یکی از رایج‌ترین مواد شیمیایی افزودنی به‌منظور بهسازی خاک‌ها، سیمان پرتلند می‌باشد. بهسازی خاک با استفاده از سیمان سابقه‌ای طولانی دارد و پژوهشگران متعددی به بررسی اثر این ماده بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال جونز و جفرسون[3] و آل‌راواس و همکاران[4] در خصوص اثرات سیمان در بهسازی خاک به مواردی شامل کاهش پتانسیل انقباض و تورم، افزایش مقاومت و ضریب الاستیک، افزایش پایداری در برابر اثر رطوبت، یخ‌زدگی و ذوب در مقایسه با خاک طبیعی اشاره کردند. خمیسا و محمدی[5]، لیتل و نیر[6] و ابوفرسخ و همکاران[7] گزارش کردند که از واکنش‌های موادی مانند کلسیم‌سیلیکات و کلسیم‌آلومینات موجود در سیمان پرتلند با ذرات خاک منجر به تشکیل محصولاتی شده که تأثیر قابل-توجهی در افزایش مقاومت خاک و کاهش فشار تورمی آن دارد. اگرچه سیمان از مواد افزودنی مناسب در بهسازی خاک محسوب می‌گردد، لیکن تولید آن با مصرف بالای انرژی و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی قابل‌توجهی همراه است که می‌توان به مصرف بالای انرژی (۵۰۰۰ مگاژول انرژی به‌ازای تولید هر تن سیمان)، مصرف منابع تجدیدناپذیر (۱/۵ تن سنگ آهک و ۱ تن خاک رس به‌ازای تولید هر تن سیمان) و هم‌چنین انتشار گاز گلخانه‌ای CO_2 (۰/۹۵ تن گاز CO_2 به‌ازای تولید هر تن سیمان) اشاره کرد [8, 9]. پژوهشگران مطالعاتی در خصوص ماده جایگزین سیمان انجام داده‌اند به‌طوری که در سال‌های اخیر استفاده از محصولات جانبی واحدهای صنعتی به‌منظور جایگزینی نسبی یا کامل با سیمان بسیار مورد توجه واقع شده‌است. سرباره کوره ذوب‌آهن (Ground Granulated Blast Furnace Slag)GGBS)) یکی از این مواد است و برای چنین کاربردهایی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌است. در تولید هر تن سرباره کوره ذوب‌آهن، ۱۳۰۰ مگاژول انرژی مصرف می‌شود و منجر به انتشار ۰/۰۷ تن گاز CO_2 به محیط می‌شود که این مقادیر کمتر از مقادیر معادل در تولید سیمان می‌باشد[8].

در صنایع ذوب‌آهن طی فرایند تولید آهن، محصول فرعی به نام سرباره تولید می‌شود که مواد تشکیل‌دهنده آن شامل سیلیکا، آلومینا و اکسیدکلسیم می‌باشد. با توجه به روش خنک نمودن آن، انواع مختلفی از سرباره تولید می‌شود. این محصولات شامل سرباره خنک شده در هوای آزاد، سرباره دمیده‌شده یا پف کرده(Expanded or Foamed Blast Furnace Slag) و سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن است. اگر سرباره مذاب به‌وسیله آب، به-سرعت خنک شود، به‌صورت ذرات شیشه‌ای درآمده و قطعاتی ترد و شکننده به اندازه ماسه تشکیل می‌شوند. ساختار فیزیکی و اندازه دانه‌ها به ترکیب شیمیایی سرباره و دمای آن در زمان خنک شدن بستگی دارد. هنگامی که این محصول خرد و آسیاب شود، به ذرات بسیار ریز تبدیل می‌شوند که سرباره دانه‌ای کوره ذوب-آهن نامیده می‌شود[10]. لازم به ذکر است که در ادامه به جای سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن، به‌اختصار از واژه سرباره استفاده می‌شود.

استفاده از سرباره در بسیاری از پروژه‌های عمرانی به‌دلایل افزایش دوام در برابر عوامل جوی، مقاومت بالا در برابر نفوذ کلریدها و حمله سولفات‌های موجود در خاک عملکرد مؤثری داشته‌است [8]. لی[11] گزارش کرد که این ماده در جاده‌سازی و بهسازی خاک در آفریقای جنوبی و انگلستان برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌است. ویلد و همکاران[12] گزارش کردند که مواد سیمانته تولید شده توسط سرباره که به-وسیله آنها فرایند سیمانی شدن و پیوند ذرات خاک به یکدیگر فراهم می‌گردد، مشابه مواد تولید شده توسط سیمان و آهک می-باشد. یادو و تریپاتی[13] در پژوهش خود در خصوص تأثیر سرباره بر روی خواص مهندسی خاک نرم، شاهد افزایش قابل-ملاحظه مقاومت تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) آن بودند. یادو و تریپاتی هم‌چنین گزارش کردند که با افزودن سرباره به خاک، پتانسیل تورمی و شاخص خمیری خاک نیز کاهش می‌یابد. پاتاک و همکاران[14] نیز از نتایج آزمایش‌های خود دریافتند که با افزودن سرباره به خاک، مقاومت فشاری و CBR افزایش چشمگیری می‌یابد. شالابی و همکاران[15] در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که افزایش مقدار سرباره سبب

کاهش خاصیت خمیری، پتانسیل تورمی و چسبندگی ذرات خاک و افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی می‌گردد.

پژوهش‌های انجام شده به‌وسیله پژوهشگران مختلف نشان داده‌است که اگر سرباره به‌تنهایی برای بهسازی خاک به‌کار رود، به‌علت آن‌که سرعت فرایند هیدراسیون آن بسیار آهسته و کند است، افزایش قابل توجهی در مقاومت و سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک مشاهده نمی‌شود[16, 17]. آنها توصیه کردند که برای غلبه بر این مسئله، فعال‌سازی سرباره قبل از افزودن به خاک مد نظر قرار گیرد. برای فعال‌سازی سرباره معمولاً سیمان، آهک و یا خاکستر بادی را با نسبت خاصی با آن مخلوط می‌کنند و سپس درصد لازم از مخلوط حاصل را برای بهسازی به خاک اضافه می‌کنند. در سال‌های اخیر اکسیدمنیزیم به‌عنوان ماده فعال کننده سرباره پیشنهاد شده‌است. جاگاندن و همکاران[18] و یی و همکاران[19] نشان دادند که مقاومت ۷ و ۲۸ روزه خاک ماسه‌ای بهسازی شده با استفاده از سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم بیشتر از مقاومت ایجاد شده توسط مواد فعال کننده سیمان و آهک می‌باشد.

ضرورت انجام این پژوهش

همان طور که بیان گردید، خاک‌های رسی نرم دارای مقاومت کم، تراکم‌پذیری و قدرت تورمی بالایی می‌باشند. بنابراین اگر از آنها در اجرای یک پروژه عمرانی به‌عنوان منبع قرضه مورد استفاده قرار گیرند و یا سازه‌ای بر روی آنها بنا شود، با توجه به خواص ذکر شده مشکلاتی در پایداری پروژه اجرا شده به وجود می‌آید. بنابراین به‌منظور اطمینان از پایداری این ابنیه‌ها می‌بایست بهسازی این خاک‌ها قبل از هر اقدامی، صورت پذیرد. هدف از این کار پژوهشی، بهسازی شیمیایی یک خاک رسی می‌باشد که با افزودن سیمان، سرباره (به‌تنهایی) و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصدها و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون با انجام آزمایش‌های لازم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌است. سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه آنها با یکدیگر، بهترین ماده افزودنی با منظور نمودن مسائل اقتصادی برای عملیات اجرایی پیشنهاد گردیده‌است.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک رسی، آب، سیمان، سرباره و اکسیدمنیزیم می‌باشد که در ادامه ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی هر یک از آنها ارائه می‌گردد.

خاک

در این پژوهش از یک نوع خاک رسی که شامل ۲۷٪ ماسه، ۳۳٪ سیلت و ۴۰٪ رس می‌باشد، استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش حدود اتربرگ نشان داد که حدود روانی، خمیری و انقباض این خاک به‌ترتیب برابر ٤٦/٤، ۲۳/۸ و۱۳٪ و شاخص خمیری آن ۲۲/٦٪ می‌باشد. وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه نیز بر اساس آزمایش تراکم استاندارد به‌ترتیب برابر ۱۷/۷ (kN/m^3) و ۱۷/۵٪ تعیین گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی، این خاک بر اساس سامانه طبقه‌بندی متحد (USCS)، رس با خاصیت خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) طبقه‌بندی گردید. هم‌چنین آزمایش‌های شیمیایی نیز روی خاک صورت گرفت که نتایج آنها در جدول (۱) آورده شده‌است. علاوه‌بر این، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD(X-Ray Diffraction)) روی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که کانی‌های این خاک شامل کوارتز، کلسیت و فلدسپار (سدیم، کلسیم و پتاسیم) و کانی‌های رسی آن نیز شامل ایلیت، کلریت و مونت‌موریلونیت می‌باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه	pH	EC	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	So_4^{2-}	$CaCO_3$	O.C.
واحد اندازه‌گیری	-	(dS/m)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(٪)	(٪)
مقدار	۸/۲	۵/۰۳	٤۲	٤٦	۲/۲	۲٦/۲	۳/۷	۱۹/۲	٤/۲	۰/۲

آب

آب مورد استفاده در این پژوهش، از نوع شرب است و میزان اسیدته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آن به‌ترتیب برابر ۷/۷۲ و (dS/m) ۱/۲ اندازه‌گیری گردید.

سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند نوع ۱ با وزن مخصوص ۳/۱۵ و درجه نرمی بلین (cm^2/g) ٤١٠٠ مورد استفاده قرار گرفت. سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بر اساس استاندارد ASTM تعیین گردید که نتایج آزمایش‌ها نشان داد که غلظت نرمال، زمان گیرش اولیه و نهایی آنها به‌ترتیب معادل ۲۵/۵٪، ۱٦۰ و ۲۲۰ دقیقه تعیین گردید. هم‌چنین آزمایش‌های لازم نشان دادند که میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۷ روزه آن نیز به‌ترتیب برابر مقادیر ۱۹/۲، ۲/۷و ٤/۳ مگاپاسکال می‌باشد.

سرباره

سرباره مورد استفاده از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تهیه گردید. براساس اطلاعات کسب شده از تولیدکننده، ترکیبات شیمیایی آن عبارتند از ٤١/٥٪ اکسیدکلسیم، ۳۵/۵ ٪ اکسیدسیلسیم، ۱۱/٥٪ اکسید آلومینیوم، ۰/۵٪ اکسیدآهن، ۸٪ اکسیدمنیزیم، ۰/۳٪ اکسیدپتاسیم، ۲/۰٪دی‌اکسیدتیتانیوم و ۰/۲٪ اکسیدسدیم. میانگین اندازه ذرات سرباره نیز، ۵۰ میکرومتر با سطح ویژه حدود (m^2/g) ٦–۲۸ می‌باشد.

اکسیدمنیزیم (MgO)

اکسیدمنیزیم به‌کار رفته در این کار پژوهشی، محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون بوده و شامل ۹٤/۲٪ اکسیدمنیزیم، ۱/۷٪ اکسید کلسیم، ۰/۸۵٪ اکسیدسیلسیم و ۰/٦۲٪ اکسیدآهن و ۰/۱٦٪ اکسید آلومینیوم می‌باشد. وزن مخصوص، میانگین اندازه ذرات و سطح ویژه آن نیز به‌ترتیب معادل ۳/۵۵، (μm) ٦۰ و (m^2/g) ۳۰۰–۲۵۰ می‌باشد.

تهیه نمونه آزمایشی

برای تهیه مخلوط سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم، نسبت ۳ (سرباره) به ۱ (اکسیدمنیزیم) انتخاب گردید. سپس درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از مخلوط حاصل برای بهسازی خاک استفاده شد[17]. هم‌چنین از سیمان و سرباره به‌تنهایی نیز در درصدهای ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های لازم برای تعیین مقاومت، ابتدا خاک طبیعی با هر یک از مواد افزودنی مخلوط شد. سپس آزمایش تراکم استاندارد جهت به‌دست آوردن وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه روی مخلوط‌های تهیه شده صورت پذیرفت. رطوبت‌های اولیه مخلوط‌های یاد شده ابتدا با افزودن آب به مقدار رطوبت بهینه رسانده شد، سپس با استفاده از روش تراکم استاتیکی اقدام به تهیه نمونه‌های مورد نیاز گردید. در این روش، مخلوط‌های یاد شده در یک قالب ویژه ریخته شد و هر لایه خاک به وسیلۀ دستگاه بارگذاری تک-محوری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه، در سه لایه متراکم گردید به‌طوری که وزن واحد حجم خشک بیشینه آن با وزن واحد حجم خشک بیشینه منحنی تراکمی مربوطه برابر شد. لازم به ذکر است که میزان بار وارده به هر لایه از مخلوط‌های خاک به روش سعی و خطا تعیین گردید. نمونه‌های ساخته شده دارای طول و قطر به‌ترتیب برابر ۱۰۰ و ۵۰ میلیمتر بودند. نمونه‌های تهیه شده بر اساس استاندارد ASTM-D1632-07 در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بالای ۹۵٪ در اتاقک مخصوصی نگهداری شدند و آزمایش مقاومت تک‌محوری در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روز بر روی آنها صورت گرفت. لازم به ذکر است که برای مقایسه دقیق‌تر نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت تک‌محوری، از هر حالت از مخلوط‌های خاک سه نمونه مقاومتی تهیه گردید و آزمایش مقاومت تک‌محوری بر روی آنها صورت پذیرفت. سپس نتایج حاصل از سه تکرار آنها با یکدیگر مقایسه و از نتایج نزدیک بهم، میانگین‌گیری شد و به‌عنوان نتیجه نهایی منظور گردید.

آزمایش‌ها

آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی خاک طبیعی، خاک–سیمان، خاک–سرباره و خاک–سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم شامل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری و SEM(Scanning Electron Microscopy) می‌باشد. به‌منظور ارزیابی اضافه کردن هر یک از مواد افزودنی ذکر شده با درصدهای مختلف به خاک رسی، آزمایش حدود اتربرگ جهت تعیین مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری و آزمایش تراکم استاندارد جهت تعیین پارامترهای تراکمی بر روی نمونه‌های یاد شده بر اساس استاندارد ASTM انجام گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش مقاومت تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM-D1633-00 با سرعت

بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی، مخلوط‌های خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم اعمال شد. عمل بارگذاری تا وقوع گسیختگی در نمونهٔ مورد آزمایش ادامه یافت. در طول آزمایش، میزان بار وارد شده و تغییرشکل ایجاد شده در نمونه به‌صورت پیوسته ثبت گردید و در نهایت با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده اقدام به تعیین منحنی تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها گردید. هم‌چنین به‌منظور بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه‌های خاک در ابعاد میکرونی، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شد. در این پژوهش، آزمایش SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصد وزنی ۱۰ در زمان عمل‌آوری ۷ روز صورت گرفته‌است. این آزمایش در آزمایشگاه نانوالکترونیک دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران انجام شد.

نتایج

در این پژوهش تعداد ۱۰ آزمایش حدود اتربرگ، ۱۰ آزمایش تراکم استاندارد، ٤ آزمایش SEM و ۸٤ آزمایش مقاومت تک-محوری (با در نظر گرفتن ۳ تکرار) بر روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم انجام پذیرفت که نتایج آنها به‌شرح زیر می‌باشد:

آزمایش حدود اتربرگ

نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ در جدول (۲) ارائه شده‌است. همان گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد، با افزودن سیمان، سرباره وسرباره فعال شده به میزان ۵٪ وزنی به خاک رس، حد روانی (LL) خاک از ٤٦/٤٪ در خاک طبیعی به‌ترتیب به مقادیر ۵۱، ۵۳ و ٥٤٪ تغییر یافته‌است. هم‌چنین نتایج مندرج در این جدول نشان می‌دهد که با افزایش درصد ماده افزودنی، روند کاهشی در مقادیر حد روانی مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که حد روانی در مخلوط خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با ۱۰٪ وزنی به‌ترتیب به مقادیر برابر ٤٨/٤، ٤٩/٦ و ۵۲٪ و برای ۱۵٪ وزنی از آنها به‌ترتیب به مقادیر برابر ٤٥/٥، ٤٧ و ٤٨٪ رسیده‌است. همین روند نیز برای حد خمیری (PL) مخلوط‌های خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم نیز مشاهده می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که با افزودن سیمان به خاک، شاخص خمیری در مقایسه با نمونه خاک طبیعی کاهش داشته که با افزایش درصد وزنی سیمان، مقدار این کاهش بیشتر شده‌است. در مقابل، افزودن سرباره و سرباره فعال شده به خاک سبب افزایش شاخص خمیری (PI) در مقایسه با خاک طبیعی شده که با افزایش درصد ماده افزودنی، مقادیر مربوط به این شاخص روند کاهشی پیدا کرده‌است.

جدول ۲ نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم نمونه‌های مختلف خاک

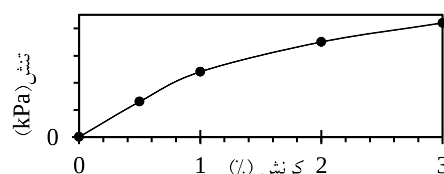
خاک	ماده افزودنی (٪)	حد روانی (٪)	حد خمیری (٪)	شاخص خمیری (٪)	رطوبت بهینه (٪)	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)
خاک طبیعی	۰	٤٦/٤	۲۳/۸	۲۲/٦	۱۷/۵	۱۷/۷
خاک-سیمان	۵	۵۱	۳۱	۲۰	۲۳/٤	۱٦/۸۵
	۱۰	٤۸/٤	۲۸/۷	۱۹/۷	۲۲/۸	۱٦/۸۳
	۱۵	٤۵/۵	۲٦/۵	۱۹	۲۲/٦	۱٦/۸۱
خاک-سرباره	۵	۵۳	۲۵/۷	۲۸	۱۹	۱۷/۷
	۱۰	٤۹/٦	۲٤	۲۵/٦	۱۹/۸	۱۷
	۱۵	٤۷	۲۳	۲۳/٦	۲۱	۱٦/٦
خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم	۵	۵٤	۲۸	۲٦	۲۲/٦	۱٦/٤
	۱۰	۵۲	۲٦	۲٦	۲۱/٦	۱٦/۲
	۱۵	٤۸	۲٤	۲٤	۲۱	۱٦/۱

آزمایش تراکم استاندارد

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد را برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصدهای وزنی مختلف نشان می‌دهد. برای خاک طبیعی وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه (kN/m^3) ۱۷/۷ و ۱۷/۵٪ به‌دست آمده‌است. مقایسه نتایج آورده شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که با افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک، مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی به‌ترتیب کاهش و افزایش یافته‌است که میزان این تغییرات با افزایش درصد مواد افزودنی بیشتر شده‌است. به‌عنوان مثال با افزودن ۵٪ وزنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک طبیعی، مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه از ۱۷/۷ کیلونیوتن بر متر مکعب (در خاک طبیعی) به‌ترتیب برابر مقادیر ۱۶/۸۵، ۱۷/۷ و ۱۶/٤ کیلونیوتن بر متر مکعب شده‌است که با افزایش درصد ماده افزودنی به ۱۵٪ این پارامتر به مقادیر ۱۶/۸۱، ۱۶/٦ و ۱۶/۱ کیلونیوتن بر متر مکعب رسیده‌است. هم‌چنین مقادیر رطوبت بهینه به‌ازای اضافه کردن ۵٪ سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک، از ۱۷/۵٪ (در خاک طبیعی) به‌ترتیب به ۲۳/٤، ۱۹ و ۲۲/٦٪ افزایش یافته‌است. با افزایش درصد ماده افزودنی به ۱۰ و ۱۵٪، روند تغییرات درصد رطوبت بهینه برای ماده افزودنی سیمان و سرباره فعال شده کاهشی و برای ماده افزودنی سرباره افزایشی می‌باشد.

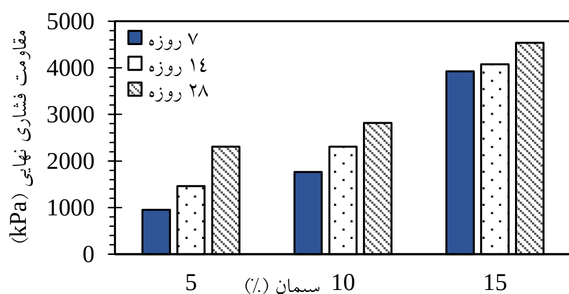
آزمایش مقاومت تک‌محوری

شکل (۱) منحنی تنش-کرنش نمونه خاک طبیعی را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری نهایی این نمونه برابر ٤۲۰ کیلوپاسکال در کرنش ۳٪ اندازه‌گیری شده‌است.



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش خاک طبیعی

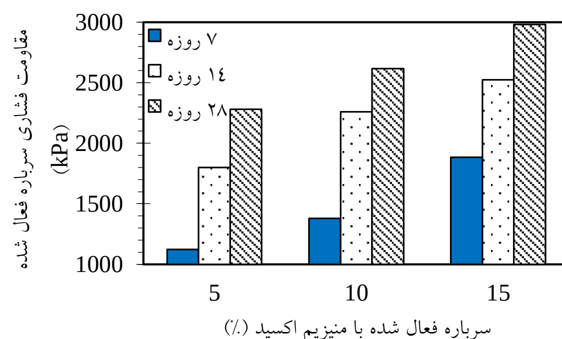
به‌منظور مقایسه بهتر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک حاوی مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، تمامی نتایج آنها در قالب نمودارهای ستونی در شکل‌های (۲)، (۳) و (٤) آورده شده‌است. شکل (۲) نشان‌دهنده چگونگی روند تغییرات مقاومت نهایی نمونه‌های خاک-سیمان در درصدهای وزنی و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزودن سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت در نمونه‌ها می‌شود که میزان این افزایش رابطه مستقیمی با درصد سیمان مخلوط شده و زمان عمل‌آوری آن دارد. به‌عنوان مثال با توجه به شکل (۲)، با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سیمان به خاک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، مقاومت نهایی نمونه‌ها به‌ترتیب برابر ۲۳۰۵، ۲۸۱۵ و ٤۵۳۵ کیلوپاسکال تعیین گردید، به بیانی دیگر افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها در حدود ۵/۵، ۷ و ۱۱ برابر مقاومت خاک طبیعی شده‌است. هم‌چنین به‌ازای افزودن مقدار ثابت سیمان به خاک، مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش داشته‌است. به‌عنوان مثال به‌ازای افزودن ۵٪ سیمان به خاک، مقدار مقاومت فشاری نهایی از ۹۵۲ کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری ۷ روز به ۲۳۰۵ کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز رسیده‌است به‌عبارت دیگر با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت نمونه ۲/٤ برابر افزایش یافته‌است.



شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان

شکل (۳) نشان‌دهنده روند تغییرات مقاومت نهایی نمونه‌های خاک-سرباره در درصدهای وزنی و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت می‌باشد. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، افزودن سرباره به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده‌است

که میزان این افزایش (مشابه سیمان) تابعی از درصد وزنی سرباره مورد استفاده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. به‌عنوان مثال با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سرباره به خاک، مقاومت نهایی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به‌ترتیب برابر ۱۸۹۱، ۲۰۲۰ و ۲۵۲۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری گردیدند که این امر نشان‌دهنده افزایش مقاومت نمونه‌های خاک بهسازی شده در حدود ٤/٥، ٥ و ٦ برابر نمونه خاک طبیعی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای افزودن درصد ثابت سرباره به خاک، مقادیر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال به‌ازای افزودن ۱۵٪ سرباره به خاک، مقدار مقاومت فشاری نهایی از ۱۸۵۵ کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری ۷ روز به ۲۵۲۰ کیلوپاسکال در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز رسیده‌است.

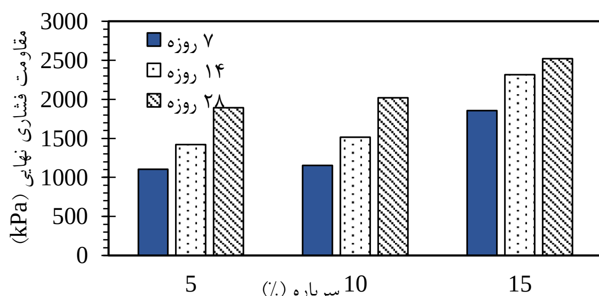


شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سرباره

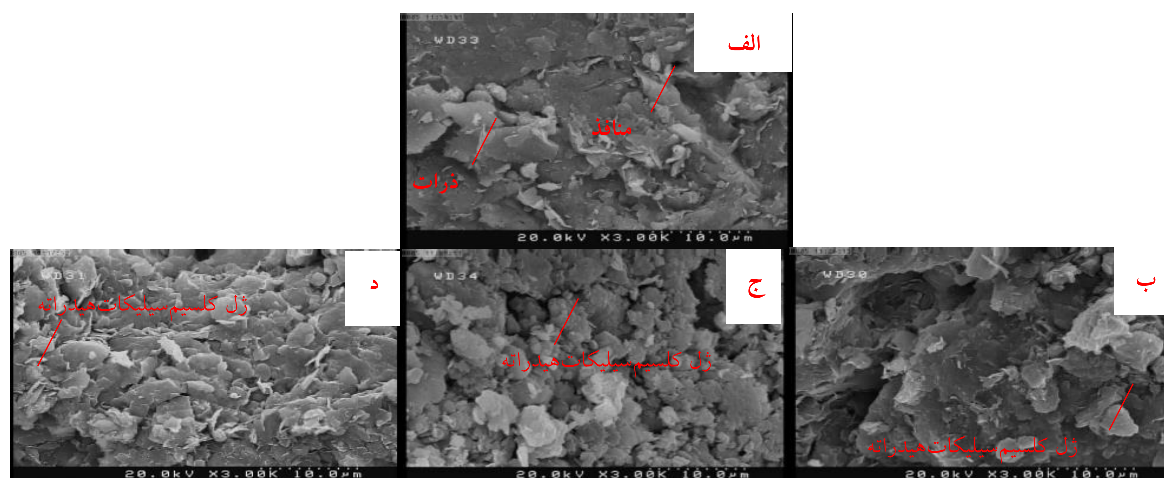
نتایج مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده با سرباره فعال شده به‌ازای درصدهای مختلف ماده افزودنی و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون در شکل (٤) آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات مقاومت نمونه‌های مذکور مشابه تغییرات ایجاد شده در شکل‌های (۲) و (۳) می‌باشد. به‌عنوان مثال با افزودن ۱۵٪ سرباره فعال شده به خاک، مقاومت نهایی نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روز به‌ترتیب حدود ٤/٥، ٦ و ۷ برابر افزایش مقاومت را در مقایسه با نمونه خاک طبیعی نشان می‌دهد.

آزمایش SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-سرباره و خاک - سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم با درصد وزنی ۱۰ و زمان عمل‌آوری ۷ روز با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل (۵) نشان داده شده‌است. همان طور که شکل (۵-الف) نشان می‌دهد، خاک طبیعی دارای ساختار مجتمع (flocculated) بوده و فضاهای خالی بسیار کمی بین ذرات مشاهده می‌شود. هم‌چنین در این شکل (شکل ۵-الف) مشاهده می‌شود که ذرات خاک بدون هیچ‌گونه اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. با افزودن سیمان (شکل ۵-ب) و سرباره (شکل ۵-ج) به خاک طبیعی، ساختار خاک مجتمع‌تر شده و میزان فضاهای خالی بین ذرات نیز در مقایسه با خاک طبیعی تغییر پیدا کرده‌است. علاوه‌بر این مقایسه تصاویر با یکدیگر نشان می‌دهد که ذرات خاک در نمونه‌های حاوی مواد افزودنی سیمان و سرباره، توسط اتصالاتی به یکدیگر متصل شده‌اند. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که افزودن سرباره فعال شده به خاک (شکل ۵-د) سبب لختگی بیشتر ساختار خاک، تشکیل ماده سیمانته‌کننده و ژل مانند نظیر ژل کلسیم‌سیلیکات‌هیدراته (CSH) و در نتیجه پر شدن فضاهای خالی به‌وسیله آن شده‌است.



شکل ٤ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم



شکل۵ نتایج عکس‌برداری SEM مربوط به نمونه‌های (الف) خاک طبیعی، (ب) خاک+ ۱۰٪ سیمان، (ج) خاک+۱۰٪ سرباره و (د) خاک+ ۱۰٪ سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در زمان عمل‌آوری ۷ روز

بحث

نتایج آزمایش حدود اتربرگ (جدول ۲) نشان داد که اضافه نمودن سه ماده افزودنی مورد استفاده در این پژوهش (سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم) به میزان ۵٪ به خاک رسی، سبب افزایش حدود روانی (LL) و خمیری (PL) در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. این امر را می‌توان چنین توجیه کرد که وقتی مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک اضافه می‌شوند با توجه به ماهیت قلیایی بودن ترکیبات شیمیایی این مواد، pH مایع منفذی افزایش می‌یابد و باعث افزایش غلظت بار منفی در لبه ذرات رس می‌شود [20]. ذره ورقه‌ای شکل دیگر شده، در نتیجه سبب تشکیل ساختار مجتمع می‌شود. این ساختار در این حالت به‌علت افزایش فضای بین ذرات، می‌تواند آب بیشتری را در خود نگه دارد که این امر منجر به افزایش حد روانی می‌شود [21]. هم‌چنین نتایج نشان داد که با افزایش درصد مواد افزودنی از ۵ به ۱۰ و ۱۵٪، روند کاهشی (در مقایسه با اضافه کردن ۵٪ از مواد افزودنی) برای این دو پارامتر مشاهده می‌شود. دلیل این موضوع آن است که با افزایش درصد مواد افزودنی، درجه مجتمع شدن ساختار خاک افزایش یافته‌است که این امر سبب چسبیدن ذرات به یکدیگر، کاهش فضای بین ذرات (در مقایسه با اضافه کردن ۵٪ ماده افزودنی) و نیز کاهش سطح ویژه می‌شود که این موضوع در نهایت حد روانی مخلوط را کاهش می‌دهد. تصاویر SEM (شکل ۵) نیز مجتمع‌تر شدن ساختار خاک و تغییر فضاهای بین ذرات را در اثر افزودن مواد افزودنی مذکور تائید می‌کند. هم‌چنین مقایسه نتایج مندرج در جدول (۲) نشان می‌دهد که با اضافه نمودن مواد افزودنی ذکر شده به خاک، مقدار حد خمیری مخلوط نیز در مقایسه با خاک طبیعی افزایش یافته‌است. این تغییرات ممکن است به‌دلیل تغییر در لزجت مایع منفذی در مقایسه با آب معمولی و تبادل یونی باشد که منجر به افزایش مقاومت برشی بین ذرات و افزایش حد خمیری می‌شود. این نتایج با یافته‌های منتشر شده توسط پژوهشگران دیگر مطابقت دارد [22, 23, 24, 25].

مقایسه نتایج مندرج در جدول (۲) نشان می‌دهد که در تمامی درصدهای استفاده شده، تأثیر سرباره فعال شده در افزایش حد روانی بیشتر از دو ماده افزودنی دیگر بوده‌است. هم‌چنین مقایسه نتایج شاخص خمیری سه ماده افزودنی استفاده شده نشان می‌دهد که سرباره و سرباره فعال شده دارای نتایج تقریباً نزدیکی در مقایسه با یکدیگر بوده و هر دوی آنها تأثیر بیشتری را در افزایش شاخص خمیری در مقایسه با سیمان داشته‌اند. با توجه به مقایسه تصاویر SEM در شکل (۵) می‌توان گفت که درجه مجتمع شدن مخلوط خاک–سرباره و خاک–سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم بیشتر از مخلوط خاک–سیمان بوده‌است که این امر ناشی از آن است که سطح ویژه آنها بیشتر از سیمان است که این امر در جذب آب و در نتیجه افزایش حد روانی و شاخص خمیری نقش مهمی را ایفا کرده‌است.

نتایج آزمایش تراکم استاندارد (جدول ۲) نشان داد که افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم به خاک، سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی شده‌است. افزودن مواد افزودنی مذکور به خاک سبب پیدایش تبادل یونی بین مواد افزودنی و خاک (براساس ظرفیت تبادل کاتیونی خاک مورد استفاده) و در نتیجه سبب اتصال ذرات با پیوندهای قوی‌تر به یکدیگر و در نهایت تشکیل ساختار مجتمع در خاک می‌شود. در این حالت ذرات خاک با پیوندهای قوی‌تری در مقایسه با خاک طبیعی به یکدیگر متصل می‌شوند. از آنجا که عمل تراکم تحت تأثیر انرژی ثابت انجام می‌شود، این انرژی ثابت نمی‌تواند پیوندهای بین ذرات را در نمونه‌های حاوی مواد افزودنی همانند پیوندهای بین ذرات در خاک طبیعی از بین ببرد که این فرایند منجر به کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه شده‌است. هم‌چنین این پدیده سبب افزایش فضاهای خالی بین ذرات در نمونه‌های حاوی مواد افزودنی شده‌است که در این فضاها میزان آب بیشتری می‌تواند وارد و نگهداری شود که این امر سبب افزایش رطوبت بهینه شده‌اند (تغییر فضاهای خالی در نمونه‌های حاوی مواد افزودنی بر اساس تصاویر SEM (شکل‌های ۵–ب، ج و د) نیز قابل مشاهده می‌باشد). این نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهشگران دیگر هماهنگ می‌باشد[22, 25, 26, 27].

مقایسه نتایج آزمایش تراکم (جدول ۲) نشان می‌دهد که به‌ازای افزودن ۵٪ ماده افزودنی، وزن واحد حجم خشک نمونه خاک حاوی سرباره بیشتر از دو ماده افزودنی دیگر بوده‌است. دلیل این امر آن است که سرباره دارای سرعت هیدراسیون پایینی می‌باشد، در نتیجه پیوند و اتصالاتی که در اثر تبادل کاتیونی تولید می‌کند در مقایسه با سیمان و سرباره فعال شده به اندازه‌ای نیست که بتواند در برابر انرژی ثابت تراکمی مقاومت کند که این امر سبب جابه‌جایی ذرات و کاهش فضاهای بین آنها می‌شود. با فعال کردن سرباره توسط اکسیدمنیزیم، سرعت هیدراسیون افزایش یافته و سبب افزایش اتصالات بین ذرات و در نتیجه کاهش وزن واحد حجم خشک و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. با افزایش درصد ماده افزودنی سرباره، محصولات هیدراسیون تولید شده افزایش پیدا می‌کند که این امر سبب افزایش پیوندهای بین ذرات، افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود.

نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری در شکل (۲) نشان داد که افزودن سیمان به خاک سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود که این افزایش تابعی از درصد ماده افزودنی به‌کار رفته و زمان عمل‌آوری می‌باشد. کزدی [24] دلیل این افزایش مقاومت را به واکنش‌های صورت گرفته بین ماده افزودنی سیمان با ذرات خاک نسبت داد. وی بیان نمود که این واکنش‌ها عبارتند از: ۱) هیدراسیون سیمان که باعث تولید کلسیم‌هیدروکسید می‌شود، ۲) جذب کلسیم‌هیدروکسید توسط ذرات رس و ۳) واکنش‌های پوزولانی خاک رس با کلسیم-هیدروکسید بین ذرات مخلوط. بنابراین با اضافه کردن سیمان به خاک، یون‌های کلسیم در طی فرایند هیدراسیون اولیه سیمان آزاد می‌گردد و تبادل کاتیونی با ذرات خاک صورت می‌گیرد. در مرحله هیدراسیون سیمان، pH محلول نیز افزایش می‌یابد که این امر سبب از بین رفتن پیوندهای سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک رس و حل شدن آنها در محلول مایع منفذی می‌شود. این مواد حل شده با یون‌های کلسیم واکنش شیمیایی می‌دهند و مواد سیمانته‌کننده‌ای تولید می‌کنند. مواد تولید شده مانند کلسیم‌سیلیکات‌هیدراته (CSH) و کلسیم‌آلومینات‌هیدراته (CAH) سبب چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل توده جامد می‌شود که این امر منجر به افزایش مقاومت خاک می‌گردد [27]. تصویر SEM نمونه حاوی سیمان (شکل ۵–ب) تشکیل ژل‌های CSH که عامل افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش مقاوت فشاری نهایی برای نمونه‌های تهیه شده از مخلوط خاک–سرباره که حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵٪ ماده افزودنی در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ١٤ و ۲۸ روزه در شکل (۳) ارائه شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گردد که با افزودن سرباره به خاک، مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد و هم‌چنین روند تغییر مقاومت با افزایش درصد وزنی سرباره و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها متناسب است. در خصوص تأثیر سرباره در بهسازی خاک رس دلایل متفاوتی گزارش شده‌است. به‌عنوان مثال ویلد و همکاران [22] گزارش کردند که سرباره در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز، تأثیری در مقاومت رس کائولینیت نداشته‌است، لیکن این امر با نتایج پژوهش حاضر مطابقت ندارد. اوتی و همکاران [28, 29] در پژوهش خود، افزایش مقاومت را با افزودن سرباره به خاک مشاهده کردند و دلیل این امر را به وجود گچ نسبت دادند. آنها استدلال کردند که گچ به‌عنوان فعال-

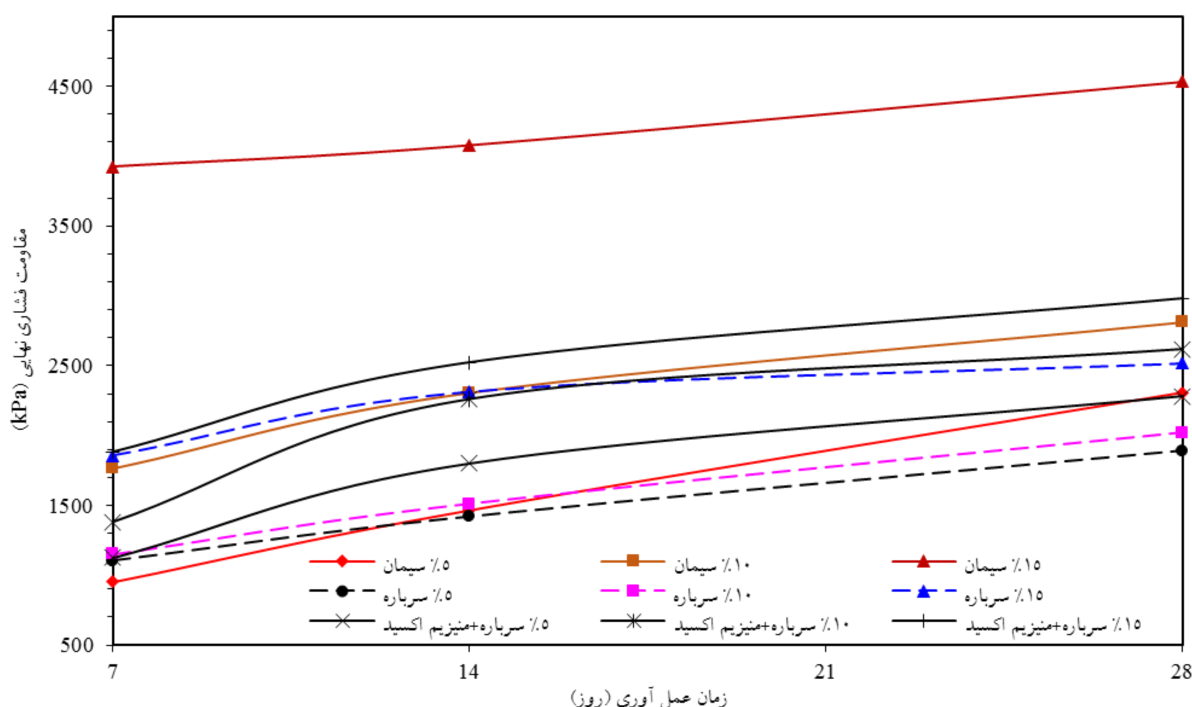
کننده سرباره موجود در خاک رس، باعث افزایش مقاومت می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر با نتایجی که توسط نیدزم و همکاران [30] گزارش شده‌است، مطابقت دارد. آنها آزمایش‌های متعددی در خصوص بهسازی خاک رس با سرباره انجام دادند و بیان کردند که افزدن سرباره منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود. نیدزم و همکاران [30] در نهایت به این نتیجه رسیدند که یک فرایند بهسازی مشابه آنچه در بهسازی خاک–سیمان مطرح است، رخ می‌دهد که باعث تشکیل مواد سیمانته‌کننده و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌شود.

به‌منظور بررسی تأثیر سرباره بر ساختار خاک رسی طی فرایند بهسازی، آزمایش SEM بر روی نمونه حاوی ۱۰٪ وزنی سرباره در زمان عمل‌آوری ۷ روزه صورت گرفت و جهت مقایسه با ساختار خاک طبیعی، در شکل (۵) ارائه شده‌است. همان گونه که مشاهده می‌شود پس از گذشت ۷ روز، مواد سیمانته‌کننده‌ای تولید شده که عامل افزایش مقاومت نمونه‌ها و چسبیدن ذرات مخلوط می‌باشد، که در این تصویر نیز دیده می‌شود. نیدزم و همکاران [30] نیز وجود این مواد سیمانته‌کننده را عامل افزایش مقاومت گزارش کردند.

برای مقایسه عملکرد دو ماده افزودنی سیمان و سرباره در بهسازی خاک رسی مورد استفاده، نتایج مقاومت فشاری نهایی این دو ماده افزودنی برای زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در شکل (٦) آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی درصدهای وزنی به‌کار رفته در این پژوهش (به‌غیر از ۵٪ ماده افزودنی در زمان عمل‌آوری ۷ روز)، سرباره عملکرد ضعیف‌تری را در بهسازی خاک رسی در مقایسه با سیمان داشته‌است. اگرچه سرباره سبب افزایش مقاومت خاک اختلاط‌یافته با آن می‌شود، لیکن اثر آن در افزایش مقاومت در مقایسه با سیمان زیاد نمی‌باشد. به هر حال افزایش مقاومت ایجاد شده به‌وسیله آن ناشی از فرایند هیدراسیون می‌باشد. لیکن در مقایسه با سیمان این عمل که منجر به تشکیل مواد سیمانته شده می‌گردد، محدود است. کینوتیا [31] بیان نمود که فرایند هیدراسیون سرباره به عواملی مانند ترکیبات شیمیایی آن، غلظت مایع موجود در بین ذرات مخلوط، سطح ویژه سرباره و درجه حرارت محیط بستگی دارد. به هر حال عدم ایجاد هیدراسیون زیاد سرباره را که در تولید مواد سیمانته شده مؤثر است را می‌توان به این صورت بیان کرد که در تماس سرباره با آب، در مراحل اولیه هیدراسیون، یک لایه ضخیم کریستالی متخلخل شامل Si-Al-O در سطح ذرات سرباره شکل می‌گیرد[32]. ریچاردسون و همکاران [33] اظهار داشتند که این لایه پوششی در برابر آب نفوذناپذیر است و از واکنش‌های هیدراسیون بیشتر جلوگیری می‌کند. لایه یادشده با جذب یون‌های H^+باعث افزایش OH^- و در نتیجه افزایش pH و خاصیت قلیایی محیط شود. لیکن این مقدار از خاصیت قلیایی سامانه هم‌چنان برای شکستن پیوندهای Si-O و Al-O خاک رس به‌منظور تشکیل ترکیبات CSH، CAH و کلسیم‌سیلیکات-آلومینات هیدراته (CASH) کافی نیست و هیدراسیون با سرعت بسیار آهسته‌ای انجام می‌گیرد. آنها هم‌چنین مشاهده کردند که تنها مقدار کمی از ژل CSH پس از 150 روز در معرض آب بودن سرباره، تشکیل شده‌است. طبق نظر آنها به‌منظور افزایش سرعت هیدراسیون سرباره و در نتیجه بهبود عملکرد آن می‌توان یک ماده افزودنی با خاصیت قلیایی بالا به آن اضافه کرد. در این پژوهش برای فعال‌سازی سرباره، از ماده افزودنی اکسیدمنیزیم با نسبت وزنی ۳ به ۱ در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ استفاده گردید و نتایج آزمایش مقاومت آن با ماده افزودنی سرباره مقایسه شد. همان‌طور که در شکل (٦) مشاهده می‌گردد، مخلوط سرباره–اکسیدمنیزیم (همانند سیمان و سرباره) سبب افزایش مقاومت می‌شود که میزان افزایش آن متناسب با درصد وزنی ماده افزودنی سرباره–اکسیدمنیزیم و زمان عمل‌آوری می‌باشد. هم‌چنین شکل (٦) نشان می‌دهد که در درصد و زمان عمل‌آوری یکسان، نمونه‌های بهسازی شده با سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم دارای مقاومت بیشتری در مقایسه با سرباره دارا می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که عمل هیدراسیون در سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم سریع‌تر رخ می‌دهد و سبب تولید مواد سیمانته‌کننده و در نتیجه سبب افزایش مقاومت می‌شود [17, 18]. جین و همکاران [34] بیان کردند در صورت استفاده از سرباره فعال شده به‌وسیله اکسید منیزیم در بهسازی خاک، در گام اول از فرایند هیدراسیون، پیوندهای موجود در واحدهای سازنده سرباره نظیرCa-O، Mg-O، Si-O-Si و Al-O-Si از بین می‌روند. سپس یون منیزیم با Si-O و Al-O ترکیب می‌گردد و ماده سیمانته‌کننده‌ای تولید می‌شود که سبب پر کردن فضاهای خالی بین ذرات و چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر

می‌شود که این امر افزایش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده خاک را سبب می‌گردد. نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهشگران دیگر مطابقت دارد [17, 35]. معمولاً استفاده از اکسیدمنیزیم به‌عنوان فعال‌کننده می‌بایست در حد معقول باشد در غیر این صورت اگر از حدی کمتر باشد، مواد سیمانته‌کننده به اندازه کافی تولید نمی‌شود و اگر هم از حدی زیادتر باشد ممکن است درصدی از اکسیدمنیزیم بدون هیداته شدن در مخلوط باقی بماند و با گذشت زمان سبب ایجاد ترک در نمونه و در نتیجه سبب کاهش مقاومت گردد.

مقایسه نتایج در شکل (٦) نیز نشان می‌دهد که در زمان عمل‌آوری ١٤ روز نمونه‌های خاک حاوی ١٠٪ سیمان، ١٠٪ سرباره-اکسیدمنیزیم و ١٥٪ سرباره، دارای مقاومت تقریباً یکسانی به‌ترتیب معادل ٢٣٠٨، ٢٢٦٠ و ٢٣١٤ کیلوپاسکال می‌باشند. برآورد اقتصادی برای بهسازی خاک رسی با استفاده از درصدهای مذکور صورت پذیرفت و هزینه هر یک از مواد افزودنی مصرفی برای یک متر مکعب از خاک محاسبه گردید. نتایج نشان داد که هزینه‌ها به‌ازای استفاده از سیمان، سرباره-اکسیدمنیزیم و سرباره به‌ترتیب برابر ١٧٠٠٠٠، ١٥٥٠٠٠ و ١٩٩٠٠٠ تومان می‌باشد که این موضوع مقرون به‌صرفه بودن استفاده از سرباره-اکسیدمنیزیم را نشان می‌دهد (محاسبه هزینه‌ها با فرض یکسان بودن هزینه عملیات اجرایی برای سه ماده افزودنی مورد استفاده و بر اساس قیمت هر یک از آنها در دی ماه سال ١٤٠٠ انجام گردیده‌است). از طرف دیگر اگر خاک مورد نظر برای بهسازی حاوی کلریدها و سولفات‌ها باشد، برای جلوگیری از نفوذ کلریدها و حمله سولفات‌ها می‌بایست از سیمان ویژه استفاده کرد که هزینه تهیه آن بیشتر از سیمان پرتلند معمولی می‌باشد. در این حالت، در صورت تأمین مقاومت مورد نظر پروژه، می‌توان از سرباره-اکسیدمنیزیم استفاده کرد که در مقایسه با دو ماده افزودنی سیمان و سرباره مقرون به‌صرفه‌تر می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که از آنجا که سرباره از محصولات فرعی تولیدشده در صنایع ذوب آهن می‌باشد و با توجه به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی که در تولید سیمان وجود دارد، استفاده از سرباره به تنهایی و به‌خصوص به‌صورت فعال شده در پروژه‌های بهسازی می‌تواند گزینه مناسبی باشد.



شکل ٦ نتایج مقادیر مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-سرباره در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهسازی یک خاک رسی با استفاده از مواد افزودنی سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم در درصدهای وزنی و زمان‌های عمل‌آوری گوناگون صورت پذیرفت. برای بررسی این هدف، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک–سیمان، خاک–سرباره و خاک–سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم صورت گرفت و نتایج زیر به‌دست آمد:

۱- با افزودن ۵٪ سیمان، سرباره و سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم به خاک رسی مورد استفاده، حدود روانی و خمیری مخلوط‌های حاصل در مقایسه با خاک طبیعی افزایش می‌یابد لیکن با افزایش درصد مواد افرودنی روند کاهشی مشاهده می‌شود. هم‌چنین مقایسه نتایج حدود اتربرگ سه ماده افزودنی نشان داد که سرباره و سرباره فعال شده دارای حد روانی و شاخص خمیری بیشتر و حد خمیری کمتری در مقایسه با سیمان می‌باشند.

۲- افزودن سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک رسی سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود.

۳- در نتیجه افزودن مواد تثبیت‌کننده سیمان، سرباره و سرباره فعال شده به خاک رسی و انجام فرایند هیدراسیون و واکنش‌های شیمیایی بین ذرات خاک و مواد افزودنی، مقاومت فشاری خاک به‌صورت چشمگیری افزایش می-یابد که میزان این افزایش مقاومت متناسب با درصد وزنی مواد افزودنی و هم‌چنین زمان عمل‌آوری می‌باشد.

٤- سیمان در مقایسه با سرباره عملکرد بهتری را در بهسازی و افزایش مقاومت خاک رسی نشان می‌دهد. علت این امر را می‌توان به تفاوت در فرایند هیدراسیون این دو ماده نسبت داد. با فعال کردن سرباره با اکسیدمنیزیم مقاومت در مقایسه با سرباره افزایش می‌یابد، لیکن هم‌چنان مقاومت آنها کمتر از سیمان است.

مراجع

1. Parsons, R. L. and Milburn, J. P., "Engineering behavior of stabilized soils", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1837, No. 1, pp. 20-29, (2003).

2. Sherwood, P., "Soil stabilization with cement and lime: State of the Art Review", HMSO, London, (1993).

3. Jones LD. and Jefferson I., "Expansive soils", ICE Publishing, London, pp. 413–441, (2012).

4. Al-Rawas, A. A., Hago, A. W. and Al-Sarmi, H., "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building and Environment*, Vol. 40, No. 5, pp. 681–687, (2005).

5. Khemissa, M. and Mahamedi, A., "Cement and lime mixture stabilization of an expansive over consolidated clay", *Applied Clay Science*, Vol. 95, pp. 104–110, (2014).

6. Little, D.N. and Nair, S., "Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials", The National Academies Press, Washington, DC., (2009).

7. Abu-Farsakh, M., Dhakal, S. and Chen, Q., "Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading", *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 3, pp. 504–516, (2015).

8. Higgins, D., "Briefing: GGBS and sustainability", *Construction Materials*, Vol. 160, No. 3, pp. 99–101, (2015).

9. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Properties of Two Model Soils Stabilized with Different Blends and Contents of GGBS, MgO, Lime, and PC", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 267–274, (2014).

10. Makarchian, M. and Naderi, H., "Effect of moisture on the CBR resistance of stabilized soil with lime and Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) in the vicinity of sulfate", *Proceedings of the 5th National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, (2010).

11. Lee, A. R., "Blastfurnace and Steel Slag. Production properties and uses", Edward Arnold Publishers Ltd., London, (1974).
12. Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I. and Higgins, D., "Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils", *Engineering Geology*, Vol. 51, No. 1, pp. 37-53, (1998).
13. Yadu, L. and Tripathi, R. K., "Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil", *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 125–131, (2013).
14. Pathak, A. K., Pandey, V., Murari, K. and Singh, J. P., "Soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag", *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, No. 5, pp. 164-171, (2014).
15. Shalabi, F. I., Asi, I. M. and Qasrawi, H. Y., "Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 29, No. 4, pp. 394–399, (2017).
16. Shi, C., Krivenko, P.V. and Roy, D., "Alkali-activated cements and concretes", Taylor and Francis, London, (2006).
17. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Properties and microstructure of GGBS-MgO pastes", *Advances in Cement Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 114–122, (2014).
18. Jegandan, S., Liska, M., Osman, A. A-M. and Al-Tabbaa, A., "Sustainable binders for soil stabilization", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, Vol. 163, No. 1, pp. 53–61, (2010).
19. Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A., "Initial Investigation into the Use of GGBS-MgO in Soil Stabilisation", *Proceedings of the 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans, pp. 444–453, (2012).
20. Taylor, A. W., "Physico-Chemical Properties of Soils: Ion Exchange Phenomena", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 85, No. 2, pp. 19–30, (1959).
21. Dash, S. K. and Hussain, M., "Lime Stabilization of Soils: Reappraisal", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 707–714, (2012).
22. Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B. and Humphreys, I., "Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates", *Clay Minerals*, Vol. 31, No. 3, pp. 423–433, (1996).
23. Akinmusuru, J. O., "Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 5, No. 1, pp. 73–80, (1991).
24. Kézdi, A., "Stabilized earth roads (development in geotechnical engineering)", Elsevier Scientific, New York, (1979).
25. Deng, S. P. and Tabatabai, M. A., "Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase", *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 24, No. 2, pp. 141–146, (1997).
26. Estabragh, A. R., Beytolahpour, I. and Javadi, A. A., "Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 969-976, (2011).
27. Estabragh, A. R., Khatibi, M. and Javadi, A. A., "Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 04015157-10, (2016).
28. Oti, J. E., Kinuthia, J. M. and Bai, J., "Using slag for unfired-clay masonry-bricks", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Construction Materials*, Vol. 161, No. 4, pp. 147–155, (2008).

29. Oti, J. E., Kinuthia, J. M. and Bai, J., "Developing unfired stabilised building materials in the UK", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers- Engineering Sustainability*, Vol. 161, No. 4, pp. 211–218, (2008).

30. Nidzam, R. M. and Kinuthia, J. M., "Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag – a review", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, Vol. 163, No. 3, pp. 157–165, (2010).

31. Kinuthia, J.M., "Property changes and mechanisms in lime-stabilised kaolinite in the presence of metal sulphates", PhD thesis, University of Glamorgan, UK, (1997).

32. Shi, C. and Day, R. L., "Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans", *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 6, pp. 1389–1396, (1993).

33. Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W. and Dobson, C. M., "The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 813–829, (1994).

34. Jin, F., Gu, K. and Al-Tabbaa, A., "Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 57, pp. 8–16, (2015).

35. Gu, K., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Shi, B., Liu, C. and Gao L., "Incorporation of reactive magnesia and quicklime in sustainable binders for soil stabilization", *Engineering Geology*, Vol. 195, pp. 53–62, (2015).